



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**
in der Helmholtz-Gemeinschaft



TU Clausthal
Clausthal University of Technology

Thermischer Speicher für Solarkraftwerke

Master-Thesis

vorgelegt von

Herrn cand.-ing. Julian Barnick

Matrikelnummer: 411189

Technische Universität Clausthal
Institut für Energieverfahrenstechnik
und Brennstofftechnik

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Technische Thermodynamik
Abteilung Thermische Prozesstechnik

Datum (Oktober 2013)

Erstgutachter: Dr.-Ing. Marco Mancini
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Roman Weber
Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Odenthal

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Ort

Datum

Unterschrift

Aufgabenstellung

Hintergrund:

In solarthermischen Kraftwerken neuerer Bauart werden derzeit thermische Speicher basierend auf einer flüssigen Salzmischung eingesetzt. Das eingesetzte Speicherinventar weist hohe Investitionskosten auf und erfordert eine aufwändige Betriebsführung um ein Erstarren des Salzes zu verhindern.

Im Rahmen des von E.ON mit dem Forschungspreis 2010 ausgezeichneten CellFlux-Projekts wird ein neuartiges Speichersystem entwickelt, bei dem die Wärme über einen Wärmeübertrager an ein geeignetes Zwischenwärmeträgermedium (z.B. Luft, CO₂) übertragen wird und die Energie im direkten Kontakt an das Speichermedium abgegeben wird. Die Leistung des Speichers wird somit durch den Wärmeübertrager bestimmt und dessen Kosten skalieren bei gegebener Leistung nur noch mit der Kapazität.

Zur Validierung des Konzeptes soll eine Pilotanlage aufgebaut werden, die eine Leistung von etwa 75kW bei einer Speicherdauer von acht Stunden aufweist. Der Wärmeübertrager wird mit Rippenrohren realisiert, als Speicherbehälter kommt ein 40 Fuß-ISO Container zum Einsatz.

Aufgabenstellung:

Im Einzelnen sollen folgende Aufgaben durchgeführt werden:

- Erarbeitung eines messtechnischen Konzepts für die Komponenten Speicher und Wärmeübertrager. Zunächst soll eine geeignete Verteilung der Thermoelemente und Differenzdruckmessstellen erarbeitet werden. Das Konzept muss in der Lage sein, mögliche Ungleichverteilungen der Temperatur zu erfassen um Rückschlüsse auf mögliche Strömungsungleichverteilung ziehen zu können. Darüber hinaus müssen Wärmeverluste nach außen sorgfältig bilanziert werden können.
- Sämtliche Messstellen sollen hinsichtlich ihrer Messgenauigkeit untersucht werden. Die Ergebnisse sollen in eine detaillierte Fehlerabschätzung einfließen, die die Fehlerfortpflanzung bis hin zu den Wärmebilanzen der Anlage einbezieht.
- Inbetriebnahme des Wärmeübertragers. Anhand des Temperaturfeldes sollen Rückschlüsse auf die Strömungsverteilung im Inneren gezogen werden.
- Eine theoretische Untersuchung der zu erwartenden Verluste der Anlage soll mit den experimentellen Daten der Anlage verglichen und abschließend bewertet werden.

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung.....
Inhaltsverzeichnis.....
Abbildungsverzeichnis.....
Tabellenverzeichnis.....
Formelzeichen.....
Indizes.....
1 Einbindung regenerative Energien in ein globales Energienetz	1
2 Charakteristik des CellFlux-Speichersystems	5
2.1 Einbindung des CellFlux-Speichersystems in ein bestehendes Solarkraftwerk	5
2.2 Übertragung des CellFlux-Speichersystems für Solarkraftwerke auf eine Pilotanlage	6
2.2.1 Ventilator.....	8
2.2.2 Wärmeübertrager.....	10
2.2.3 Rohrsystem.....	12
2.2.4 Wärmespeicher und Speichermaterial.....	12
2.2.5 Isolierung.....	14
2.2.6 Messinstrumente.....	14
2.3 Wärmebilanzen	18
3 Auslegung der Systemkomponenten der Pilotanlage	22
3.1 Temperaturerfassung der Pilotanlage	22
3.2 Dimensionierung des Rohrsystems.....	26
3.2.1 Druckverluste in den Rohrleitungen.....	27
3.2.2 Leckage-Berechnung der 2-Wege-Verteiler.....	29
3.2.3 Auswahl geeigneter Dichtungen für die 2-Wege-Verteiler.....	31
3.3 Berechnung der Isolierung.....	31
3.4 Strömungsgleichrichter	35

3.5	Toleranzen und Abweichungen der Messinstrumente	37
3.5.1	Grundlagen der Fehlerrechnung	37
3.5.2	Fehlerfortpflanzung der Messwerte der Versuchsanlage	41
4	Berechnung und numerische Simulation des Wärmeübertragers.....	44
4.1	Grundlagen der Berechnung von Wärmeübertragern	44
4.1.1	Grenzschichttheorie eines strömenden Fluides	44
4.2	Wärmeübergangsbeziehungen an Kreisrippenrohren	46
4.2.1	Druckverlust über den Wärmeübertrager	50
4.3	Effektivitäts-Beurteilung eines Wärmeübertragers nach der ε -NTU Methode.....	51
4.4	Numerische Berechnung	52
5	Thermische Leistung und Verluste des Wärmeübertragers	54
5.1	Untersuchung der Strömungsverteilung im Wärmeübertrager	54
5.1.1	Vergleich der Austrittstemperaturen mit verschiedenen Strömungsprofilen	57
5.2	Vergleich der gemessenen mit den simulierten Temperaturen	58
5.3	Druckverlust über die Rohrebenen	61
	Zusammenfassung.....	62
	Ausblick.....	62
	Literaturverzeichnis.....	63
	Anhang	I
A1:	Konzentrationsfaktor von Solarkraftwerken.....	I
A2:	Stoffdaten Fluide und Materialien	II
A3:	Lage der Messinstrumente	III
A4:	Quellcode des Grenzschicht-Tools	IV
A5:	Quellcode des Kreisrippen Wärmeübergangskoeffizienten und Wirkungsgrad-Tools ..	V
A6:	Quellcode des Iteration-Tools.....	VII
A7:	Zeichnung und Abmaß des Innencontainers.....	IX
A8:	Messwerte Wärmeübertrager	X